

文章编号: 1674—8247(2019)01—0028—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.01.006

季节性冻土区路基冻胀评价及工程对策研究

杨军生 王春雷

(中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308)

摘要:季节性冻土地区修建高速铁路的主要工程问题是路基冻胀。针对此问题,近年来铁路建设单位在华北、西北多个高速铁路建设中连续开展了几年的冻胀监测工作。冻胀监测内容多、数据量大,文章综合各线连续几个冻融周期监测成果,对高速铁路路基冻胀评价方法进行了尝试性研究,并总结了冻胀原因,提出了工程措施建议,可为今后类似地区铁路勘察、设计、施工提供参考。

关键词:季节性冻土区; 高速铁路; 路基; 冻胀监测; 冻胀评价; 工程对策

中图分类号: TU 445 文献标志码: A

Evaluation of Frost Heaving of and Engineering Countermeasure for the Subgrade in the Seasonal Frozen Soil Area

YANG Junsheng WANG Chunlei

(China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: The main engineering problem is the subgrade frost heaving for high-speed railway construction in the seasonal frozen soil area. In response to this problem, in recent years, the railway construction companies have carried out the frost heaving monitoring in construction of multiple high-speed railways in North China and Northwest China for several years. Because of a lot of frost heave monitoring contents and data, this paper, based on the monitoring results of several consecutive freeze-thaw cycles of each line, makes a tentative study on the evaluation method of frost heaving of high-speed railway subgrade, summarizes the causes of frost heaving, and puts forward suggestions for engineering measures, which can provide reference for survey, design and construction of railway in similar areas in the future.

Key words: seasonal frozen soil; high-speed railway; subgrade; frost heaving monitoring; frost heaving evaluation; engineering countermeasure

我国东北地区铁路网密布,大部分线路地处季节性冻土地区,既有线路基冻害发生比较普遍。结合各铁路路基工程特点,在哈牡、哈齐、盘营及沈丹等客运专线建设过程中,均开展了几个冻融周期的路基冻胀变形监测工作。由于路基冻胀机理复杂,影响因素较多且相互作用^[1-3],监测内容多、数据量大,针对高速铁路毫米级变形标准,正确、科学地进行冻胀评价十分困难^[4-5]。

本文结合近几年工作实践^[6-9],尝试性研究了一套高速铁路路基冻胀评价方法,总结了冻胀原因,提出了工程措施建议,研究成果可为建设质量评价和安全运营提供参考。

1 高速铁路路基冻胀评价技术要点

高速铁路路基冻胀评价内容较多,加之路基冻胀机理复杂,影响因素多且相互作用,限于篇幅,仅对几

收稿日期:2018-11-28

作者简介:杨军生(1969-),男,高级工程师。

引文格式:杨军生,王春雷. 季节性冻土区路基冻胀评价及工程对策研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(1):28-33.

YANG Junsheng, WANG Chunlei. Evaluation of Frost Heaving of and Engineering Countermeasure for the Subgrade in the Seasonal Frozen Soil Area [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(1): 28-33.

项技术要点进行概述。

1.1 气候特点评价

通过各线自动监测及轨道综合列车检测结果表明,路基冻胀变形发展与气温的变化紧密相关。气候特点评价是区域路基工程冻胀评价的基础,其评价的指标主要通过气温特征和气候冻结指数实现。

牡绥高速铁路沿线各城市的2013-2014年度冬季大气温度变化移动平均曲线,如图1所示。

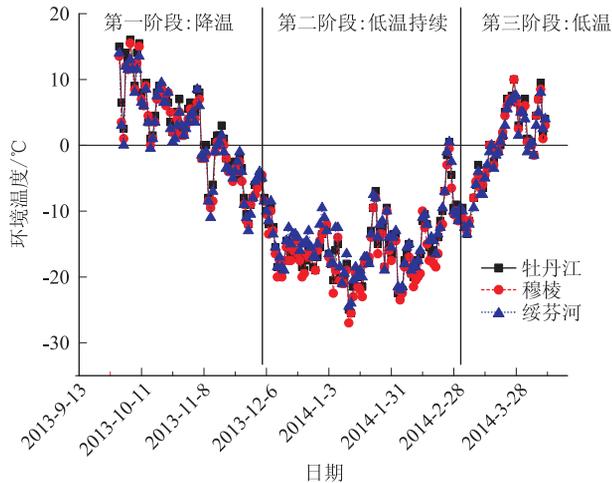


图1 2013-2014年牡绥线沿线主要城市气温变化曲线

由图1可知,各地气温波动曲线形状完全一致,呈下凹状,大致可分为温度下降、低温持续、温度回升3个阶段。根据轨道检测结果,在气温下降期,降温作用十分明显,轨道状态也出现超限情况,并一直呈现迅速增加的趋势;在低温持续期超限数量有一定程度的增加,但增速减缓;在温度上升期,温度回升到 0°C 以上,轨道状态超限数量开始迅速减小,直到基本消失。

气候冻结指数是指一年或整个冬季中连续低于 0°C 气温的持续时间与气温数值乘积之总和。以牡绥线为例,2个年度冻结指数对比,如表1所示。

表1 2013-2014年度牡绥线沿线主要城市冻结指数

城市	纬度/ $^{\circ}$	负温第一次出现	负温完全消失	冻结指数/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})$
牡丹江	44.6	2013-11-7	2014-4-07	1 574.5
穆棱	44.9	2013-11-7	2014-4-06	1 671
绥芬河	45.3	2013-10-15	2014-4-12	1 677.5

由表1可得2个年度该线沿线冻结指数分布情况,可知东北冻结指数基本上沿着纬度呈增大趋势,冻胀评价中,气候冻结指数可以较好的反映每个监测年度沿线区域气温特征,冻结指数的大小决定了冻结深度的大小,也间接影响冻胀变形。目前在铁路及相关领域,设计采用的冻结深度普遍采用了冻结指数作为

最基本的参数。

1.2 人工变形观测数据统计分析方法

人工变形观测是指通过几何水准量测方式获取的路基面变形数据,它的优点是覆盖面广,数据可靠,是路基冻胀评价的基础。

针对人工变形观测数据的处理,首先可以结合高速铁路运营标准及相关经验,将变形数据划分为 4 mm 、 8 mm 、 10 mm 、 12 mm 等级别进行分类统计,掌握路基总体变形情况。牡绥线人工观测数据统计分析如表2所示。

表2 牡绥线路基冻胀变形统计表

路基形式	统计值	变形 $\leq 4\text{ mm}$	变形 $(4, 8]\text{ mm}$	变形 $(8, 10]\text{ mm}$	变形 $(10, 12]\text{ mm}$	变形 $> 12\text{ mm}$	
	测点数	测点数	测点数	测点数	测点数	测点数	
路基	数量	2 406	2 009	250	119	28	0
	比例	100%	83.50%	10.39%	4.95%	1.16%	0.00%
路堤	数量	785	667	73	32	13	0
	比例	33%	85%	9%	4%	2%	-
路堑	数量	763	623	90	45	5	0
	比例	32%	81.65%	11.80%	5.90%	0.66%	-
路桥过渡段	数量	245	201	26	15	3	0
	比例	10%	82.04%	10.61%	6.12%	1.22%	-
路涵过渡段	数量	469	398	42	24	5	0
	比例	19%	84.86%	8.96%	5.12%	1.07%	-
涵洞顶	数量	144	120	19	3	2	0
	比例	6%	83.33%	13.19%	2.08%	1.39%	-

由表2可知:①本年度全线统计2 406个测点,最大冻胀变形为 9.28 mm ,为一般路堤工点。②全线冻胀变形 $\leq 4\text{ mm}$ 测点占总数83.50%, $4\sim 6\text{ mm}$ 测点约占总数10.39%, $6\sim 8\text{ mm}$ 测点约占总数4.95%,大于 8 mm 测点占全部测点数1.16%,无大于 10 mm 变形。总体冻胀变形较好。③按工点类型统计,各工点类型冻胀变形 $\leq 4\text{ mm}$ 在81.65%~85%范围内,大致相当。另外,大于 8 mm 测点共28个,其中13个约46.4%发生在路堤地段,路堑及路涵过渡段分别各5个(各占17.9%),路桥过渡段3个(占10.7%),涵洞顶2个(占7.1%)。

其次,可将人工观测数据沿线路方向每 10 km 划分成一个区段,统计区段内各路基段冻胀量平均值及最大值,绘制沿线纵向区段路基冻胀变形分布图,掌握沿线冻胀分布特征,确定冻害发生严重段落及里程。牡绥线沿线纵向区段路基冻胀量分布如图2所示。

结合表2和图2,可挑选连续变形较大的工点,掌握沿线冻胀较大段落,结合冻胀原因核查,判定冻胀较

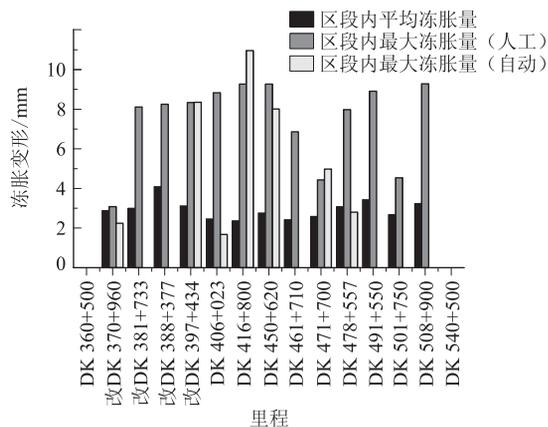


图 2 牡绥线沿线纵向区段路基冻胀量分布图

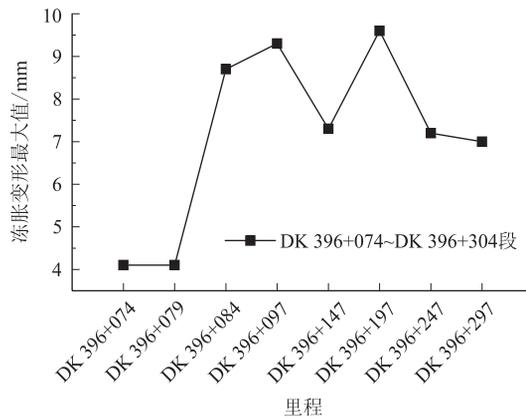


图 3 冻胀变形最大值随里程变化曲线

大段落冻胀原因、冻胀时间、冻胀主要发生部位等,为冻胀整治提供依据。具体方法为:①首先确定冻胀较大段落(如表 3 所示),通过表 3 可知牡绥线冻胀大于 8 mm 共 5 个段落,应重点关注。②绘制各段落冻胀变形最大值随里程变化曲线、线路左中右冻胀最大值随里程变化曲线及典型测点冻胀变形随时间变化曲线(如图 3、图 4 所示),由此可知该段冻胀变形 8 ~ 12 mm 的 3 个,大于 12 mm 的 0 个。另外本段冻胀变形右侧明显偏大,中部其次,左侧最小。③经调查,该段地势左低右高,现场为汇水地形,路基以低填通过,路基右侧坡脚处积存雨雪水,路堤填筑后右侧表水易渗入路堤本体,基床个别点填料细颗粒含量不满足要求,致使冻胀量偏大,即冻胀补强设计中,应重点注意该段防排水设计及填料的质量。

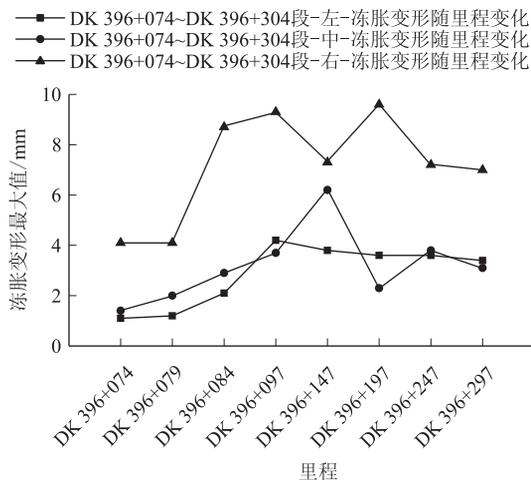


图 4 线路左、中、右冻胀最大值随里程变化曲线

表 3 牡绥线连续冻胀变形较大段落统计表

段落	长度 /m	工点类型	变形统计
DK 396 + 074 ~ DK 396 + 304	230	路堤	9.61/3
DK 406 + 173 ~ DK 406 + 558	385	路堑	8.83 /3
DK 440 + 916 ~ DK 441 + 100	184	路堤	9.27 /2
DK 482 + 370 ~ DK 482 + 785	415	路堤	8.91/5
DK 508 + 730 ~ DK 508 + 900	170	路堤	9.28 /5

1.3 自动监测数据统计分析

自动监测数据分析主要包括路基分层变形情况、实测最大冻结深度及冻胀规律 3 个方面。

(1)路基分层变形情况分析可结合路基结构,对基床表层、基床底层及基床以下几个部位变形情况分别进行统计,掌握分层变形情况,进而为冻胀整治提供依据。牡绥线分层冻胀统计结果如表 4 所示。可以看出:全部工点统计中,表层冻胀变形占全部变形约 30.4%,表明基床底层同样是防冻胀关键部位。另外路堑工点冻胀变形主要发生在表层,路堤工点冻胀变形主要发生在基床底层,对应防冻胀设计及整治宜分

表 4 牡绥线路基分层冻胀变形情况统计表

序号	里程	路基形式	基床平均/最大冻胀 /mm	表层平均冻胀 /mm	底层平均冻胀 /mm	表层/底层/%
1	DK 396 + 225	路堤	3.6/5.11	1.57	2.03	43.61
2	DK 396 + 250	路堤	10.86/14.89	2.99	7.87	27.53
3	DK 396 + 700	路堑	1.6/2.43	0.81	0.79	50.63
4	DK 402 + 080	路堑	0.44/2.7	0.39	0.05	88.64
5	DK 402 + 105	路堑	0.98/2.79	0.34	0.64	34.69
6	DK 402 + 500	路堤	8.34/15.48	0.11	8.23	1.32
7	DK 402 + 525	路堤	2.13/6.32	0.84	1.29	39.44
8	DK 449 + 000	路堑	2.13/3.18	1.27	0.86	59.62
9	DK 449 + 025	路堑	1.53/2.68	0.24	1.29	15.69
10	DK 449 + 500	路堤	2.79/3.78	0.92	1.87	32.97
11	DK 449 + 525	路堤	5.7/8.83	0.1	5.6	1.8
12	DK 450 + 100	路堑	2.73/5.54	1.39	1.34	50.92
13	DK 450 + 125	路堑	4.48/7.14	3.42	1.06	76.34
合计(平均/总值)				1.11/14.39	2.53/32.92	30.4

(2)实测最大冻深如表 5 所示,可得实测冻深与

收集资料冻深对比情况。

表5 牡绥线路基实测冻结深度统计表

序号	里程	路基形式	实测最大冻深/m	资料收集最大冻深/m	实测/资料收集/%
1	改 DK 371 +097	路堑	2.31	1.91	120.94
2	改 DK 396 +641	路堤	1.58	1.91	82.72
3	DK 396 +225	路堤	1.94	1.91	101.57
4	DK 396 +250	路堤	1.75	1.91	91.62
5	DK 396 +700	路堑	1.17	1.91	61.26
6	DK 402 +080	路堑	1.2	1.91	62.83
7	DK 402 +105	路堑	1.52	1.91	79.58
8	DK 402 +500	路堤	1.07	1.91	56.02
9	DK 402 +525	路堤	0.88	1.91	46.07

由表5可知,本线冻土路基9个自动监测断面中,5个冻深实测值大于收集资料的最大冻深,实测冻深符合率仅为46.67%,二者比值最大达120.94%。

通过监测可以掌握区域冻深发展情况,防冻胀设计参数应结合冻胀监测实际冻深为准及时调整,冻胀较大段落也应及时查找原因并进行补强防冻胀设计。

(3)冻胀规律的分析包括冻胀变形随时间、冻结深度随时间、地下水位随时间以及含水量与冻胀变形、冻结深度与冻胀变形等各因素之间相关关系的分析,通过冻胀规律的分析可掌握路基冻胀特征,对防冻胀设计、整治及运营维护均有重要的意义,冻胀规律评价方法及主要成果在下章节详细分析。

2 高速铁路路基冻胀特征分析研究

研究高速铁路季节冻土区路基冻胀变形特征和分布规律是高速铁路路基冻胀变形控制、冻胀机理解释、以及探索适用的防冻胀措施等方面研究的前提。本文通过冻胀评价方法对路基冻胀特点进行分析研究,总结路基工程冻胀特点和冻胀规律,为今后有针对性地进行防冻胀设计提供参考。

2.1 路基结构冻胀特点

(1)从工点类型来看,路基过渡段冻胀变形偏小,其次路堤,路堑最大,初步说明过渡段采用的路基设计方案(倒梯形过渡,分层填筑掺加5%水泥的级配碎石)对控制冻胀变形好于一般路基地段。

(2)分层变形统计中,路基表层冻胀变形占全部变形约1/3,表明基床底层同样是防冻胀关键部位。

(3)路基不同位置冻胀变形大致相当,没有表现出路肩或坡脚变形大、轨面变形小的特点,也没有表现出原始地面冻胀大、路基冻胀变形小的规律。各位置冻胀没有表现出明显差异。

(4)有约25%~46%的路基实测冻结深度大于通过气象站收集资料获取的土壤最大冻结深度,尤其是路堑工点(85%以上大于收集资料冻深),二者比值最

大达177.49%,说明山区路堑地段的路基设计冻深值得进一步考虑。

2.2 路基冻胀规律

路基冻胀是一个缓慢积累和发展的过程,在这一过程中,不同时期的冻胀量及其增长速度不同。高速铁路路基冻胀过程基本可划分为初始波动、快速冻胀、稳定冻胀以及融化回落4个阶段(如图5所示)。第一阶段为初始波动阶段,冻结初期,冻胀变形随时间增加,反复波动,无明显变幅;第二阶段为快速冻胀阶段,进入冻期后,冻胀变形随时间快速发展,迅速提升;第三阶段为稳定冻胀阶段,冻胀变形达峰值后,变形发展相对平稳;第四阶段为融化回落阶段,即进入融期后,冻胀变形迅速回落,完成一个冻融周期。

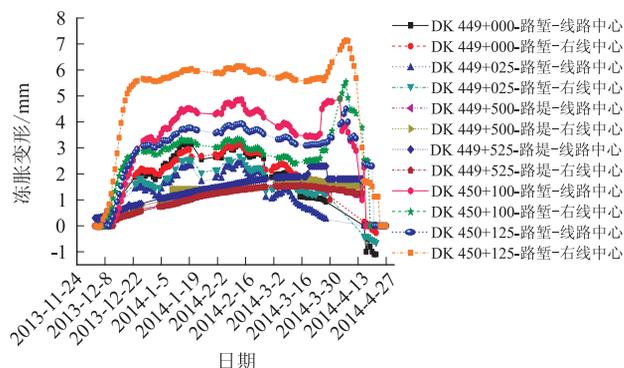


图5 牡绥线典型路基断面冻胀总变形随时间变化曲线

2.3 含水量与地下水位的关系

通过监测发现,路基内部含水量以及地下水条件是冻胀变形大小的决定性因素,分析季节冻土区高速铁路路基内部含水量及地下水的关系,是解释路基冻胀机理,防治路基冻胀病害的关键。

牡绥铁路含水量与地下水位的关系如图6所示,主要表现出3种特征。

(1)冻期前地下水位大于8m时,地下水水位变化对路基本体含水量基本无影响,如图6(a)所示。

(2)冻期前地下水位在4m左右时,针对路堑工点或浅挖低填段,地下水对基床表层含水量基本无影响,但影响到了基床底层的含水量,基床底层及以下含水量较大,可达50%~70%。进入冻期后,地下水水位降低,对基床底层含水量减小,地下水对基床底层几乎无补给,如图6(b)所示。

(3)冻期前地下水位小于4m时,针对本路堤工点(浸水路堤,路堤高大于6m),地下水对基床表层含水量影响不大,整个冻期基床底层含水量在30%左右,如图6(c)所示。针对本地下水路堑工点,地下水对基床底层下部影响较大,整个冻期接近饱和,对表层及底层上部仅局部有影响,如图6(d)所示。说明地下水较浅时(小于4m),对路基基础底层含水量有较大

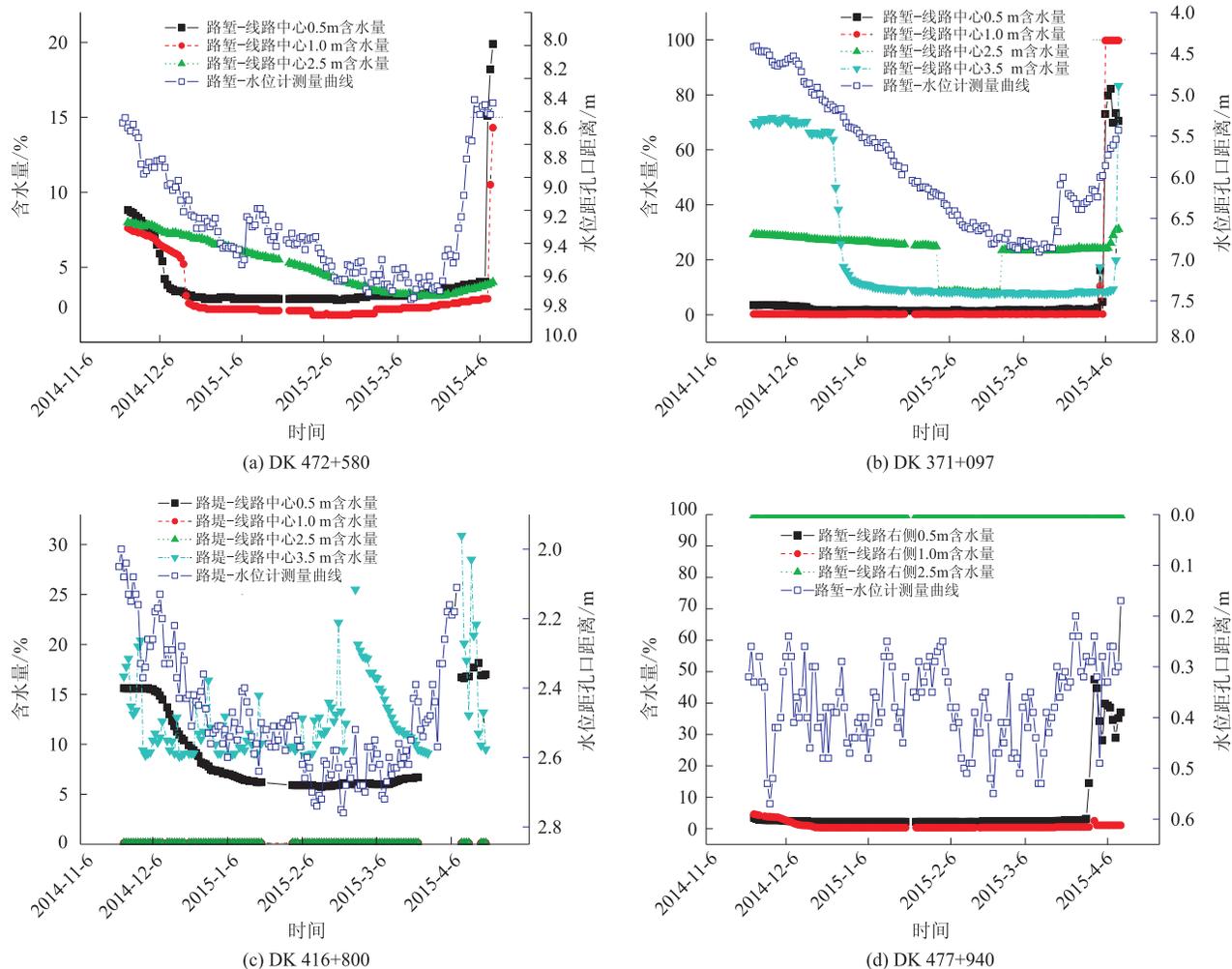


图6 含水量与地下水位关系图

影响,填料及防排水措施应适当加强。

3 高速铁路路基冻胀原因分析及工程对策建议

路基冻胀评价的目的是为了分析冻胀原因,有针对性地进行工程处理方案设计。根据近几年各线监测成果,结合土的冻胀性、水、冻结温度等冻胀3因素,初步总结冻胀原因,提出了如下工程对策和建议,供今后季节性冻区铁路建设指导和参考。

(1) 季节性冻土地区进行铁路建设时,在建设过程中,防排水措施的完善和路基土施工压实质量是防冻胀关键。防排水措施应在冻期前保持和路基本体填筑同步或提前,排水措施无法及时实施时,也应做好临时排水工程,保证冻期前路基地表、地下水排水通畅。

(2) 填料质量是路基冻胀的重要因素,施工中应严格控制填料中的细粒土含量,在保证填料质量(细颗粒含量、压实度)的前提下,可有效控制路基本体的冻胀。

(3) 通过近几年监测发现,路堑工点冻胀变形主

要发生在表层,路堤工点冻胀变形主要发生在基床底层,即与表层一样,基床底层同样是防冻胀关键部位。

(4) 山区半挖低填路段路基地形上是左低右高(或左高右低),高的一侧易汇水积水。监测普遍发现类似工点路基靠路堑一侧冻胀变形最大、中间其次,低的一侧最小,说明汇水地段为低填浅挖段路基。在汇水一侧宜设置渗水盲沟,保障路基本体排水通畅,减小冻胀性。

(5) 硬质岩地段路堑基床的横向排水坡应保持一定坡度且应平整,避免表面积水,冻胀变大。

(6) 建议冻胀监测与施工同步开展,防冻胀设计参数应结合冻胀监测实际冻深及时调整,冻胀较大段落也应及时查找原因并进行补强。

(7) 在季节性冻土地区的铁路建设中开展冻胀监测是有必要的,可掌握全线冻胀情况,有针对性开展防冻胀补强,保障建设质量和运营安全。

4 结束语

本文根据近年来多个高速铁路路基冻胀监测项

目。结合考虑高速铁路建设及运营特点,对路基冻胀评价方法技术要点进行了研究,可为科学系统地进行建设质量评价和运营状态评估提供依据。同时,结合近几年各线防冻胀措施、冻胀监测及路基填料核查结果,总结出冻胀成因,提出工程对策和建议,供今后季节性冻区铁路路基勘察、设计、施工参考和指导。

参考文献:

- [1] 徐教祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社,2010.
XU Xiaozu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Physics of Frozen Soil [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [2] 田士军. 哈大高速铁路路基冻胀自动观测和深化分析研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(11): 7-10.
TIAN Shijun. Automatic Observation and Intensive Analysis of Frost Heaving of Harbin-Dalian High-speed Railway Subgrade [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(11): 7-10.
- [3] 朱鸿鹄,施斌. 地质和岩土工程光电传感监测研究进展及趋势——第五届 OSMG 国际论坛综述[J]. 工程地质学报, 2015, 24(2): 352-360.
ZHU Honghu, SHI Bin. Current Progress and Trends of OPTO-Electronic Sensor-Based Monitoring in GEO-Engineering——A Summary of 5th OSMG-2014[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 24(2): 352-360.
- [4] 陈虎,张戎晟,冷景岩. 大西客运专线寒冷地区路基冻胀现场试验[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(12): 6-9.
CHEN Hu, ZHANG Rongken, LENG Jingyan. Field Test of Subgrade Frost Heaving on Datong-Xi'an Passenger Dedicated Line in Cold Region [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(12): 6-9.
- [5] 张建明,刘端,齐吉琳. 青藏铁路冻土路基沉降变形预测[J]. 中国铁道科学, 2007, 15(3): 12-17.
ZHANG Jianming, LIU Duan, QI Jilin. Estimation on the Settlement and Deformation of Embankment along Qinghai-Tibet Railway in Permafrost Regions [J]. China Railway Science, 2007, 15(3):

12-17.

- [6] 铁道第三勘察设计院集团有限公司. 新建铁路牡绥线路基冻胀监测及整治方案研究总报告(2013-2014年度及2014-2015年度)[R]. 天津:铁道第三勘察设计院集团有限公司,2014.
The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation. The General Research Report on Monitoring and Treatment Scheme for Subgrade Frost Heaving in Mudanjiang-Suifenhe Passenger Dedicated Railway Line(2013-2014 and 2014-2015) [R]. Tianjin: The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, 2014.
- [7] 铁道第三勘察设计院集团有限公司. 新建铁路哈齐客专路基冻胀监测工作研究总报告(2012-2013年度,2013-2014年度及2014-2015年度)[R]. 天津:铁道第三勘察设计院集团有限公司,2015.
The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation. The General Research Report on Monitoring of Subgrade Frost Heaving in Harbin-Qiqihar Passenger Dedicated Railway Line(2012-2013, 2013-2014 and 2014-2015) [R]. Tianjin: The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, 2015.
- [8] 铁道第三勘察设计院集团有限公司. 新建铁路沈丹客专路基冻胀监测工作研究总报告(2013-2014年度及2014-2015年度)[R]. 天津:铁道第三勘察设计院集团有限公司,2015.
The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation. The General Research Report on Monitoring of Subgrade Frost Heaving in Shenyang-Dandong Passenger Dedicated Railway Line(2013-2014 and 2014-2015) [R]. Tianjin: The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, 2015.
- [9] 铁道第三勘察设计院集团有限公司. 新建铁路大西客专路基冻胀监测工作研究总报告(2013-2014年度)[R]. 天津:铁道第三勘察设计院集团有限公司,2015.
The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation. The Research Report on Monitoring of Subgrade Frost Heaving in Datong-Xian Passenger Dedicated Railway Line(2013-2014) [R]. Tianjin: The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, 2015.

(编辑:车晓娟 张红英)

(上接第5页)

- [8] 陈文,孙洪广,李西成,等. 力学与工程问题的分数阶导数建模[M]. 北京:科学出版社,2010.
CHEN Wen, SUN Hongguang, LI Xicheng, et al. Fractional Derivative Modeling of Mechanical and Engineering Problems [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [9] 张攀. 高铁无砟轨道扣件系统弹性垫板温/频变动力特征及其影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
ZHANG Pan. Research on Temperature/Frequency Variable Dynamic Characteristics of Elastic Cushion Plate in Ballastless Track Fastener System of High-speed Railway and Its Influence [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

- [10] Berg M. A Non Linear Rubber Spring Model for Rail Vehicle Dynamics Analysis[J]. Vehicle Syst. Dyn. 1998, 30(Issue 3-4): 97-212.
- [11] Kai Wei, Feng Wang, Ping Wang, et al. Effect of Temperature- and Frequency-dependent Dynamic Properties of Rail Pads on High-speed Vehicle-track Coupled Vibrations [J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(3): 351-370.
- [12] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(第四版)[M]. 北京:科学出版社, 2015.
ZHAI Wanming. Vehicle-track Coupling Dynamics (Fourth Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2015.

(编辑:刘会娟 苏玲梅)